

粘弾性特性を有するエネルギー吸収材料を用いた建築耐震構造の地震応答特性に関する研究

著者	伊藤 嘉朗
号	2541
発行年	2000
URL	http://hdl.handle.net/10097/7814

氏 名	いとう よしお 伊 藤 嘉 朗
授 与 学 位	博士（工学）
学位授与年月日	平成12年4月12日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科、専攻の名称	東北大学大学院工学研究科（博士課程）建築学専攻
学 位 論 文 題 目	粘弾性特性を有するエネルギー吸収材料を用いた 建築耐震構造の地震応答特性に関する研究
指 導 教 官	東北大学教授 井上 範夫
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 井上 範夫 東北大学教授 山口 育雄 東北大学教授 源栄 正人

論 文 内 容 要 旨

1. 背景と目的

動的地震応答解析技術の発展を背景として、建築構造物における地震等の振動を抑制する目的で、様々なエネルギー吸収機構を建築構造内に取り込んだ制振構造の研究開発、さらに、実建物への適用が活発に進められている。

現在考えられているエネルギー吸収機構としては、大別して履歴系のものと粘性系のものがある。

履歴系のエネルギー吸収機構としては、低降伏点鋼を利用した鋼材系ダンパー、鉛ダンパー、摩擦ダンパー等がある。特に、1995年兵庫県南部地震以後、大地震時の被害低減を目指して、(極)低降伏点鋼を利用した履歴系ダンパーが現在数多く実用化され、実構造物に適用されている。今後、耐震設計法の一つとして定着していくものと考えられる。

粘性系としては、オイルダンパー、粘性体壁等がある。粘性系の特徴は、小振幅域から大振幅域まで、振幅にあまり依存せず機能する点にあり、風振動、あるいは、中小地震から大地震まで、広い振幅範囲で応答低減効果を期待できる。また、粘性系ダンパーと類似したものとして、粘弾性体ダンパーがある。粘弾性体ダンパーは、これまで風振動を対象としてきたが、近年では、耐震用としての利用が研究されている。

弾塑性系や、粘性系・粘弾性系のエネルギー吸収機構を利用した耐震設計法は、建築物の耐震性を向上させる可能性があるとして期待されている。そのためには、エネルギー吸収機構を設置した建築構造に対する、適切な設計法が確立される必要がある。

エネルギー吸収機構を含む建築物の地震応答解析法について考えてみると、履歴系ダンパーの力学的特徴は、基本的に一般的な鋼材と同一であり、設計に必要な解析手法はこれまでの動的弾塑性地震応答解析技術の延長で対処できる。また、粘性系ダンパーの抵抗力は、変形速度の簡単な関数として定式化されており、時刻歴地震応答解析に容易に取り入れることができる。履歴系ダンパー、粘性系ダンパーの導入は、建築構造設計者にとって受け入れやすいものとなっている。

一方、粘弾性体を使用したエネルギー吸収耐震構造に関する研究は、履歴系や、粘性系に比較して、極めて少なく、実施例もわずかである。粘弾性体の動的抵抗は、振動数依存性が無視できない程大きく、その明確な評価方法が確立されているとはいえない。そのため、粘弾性体を使用したエネルギー吸収耐震構造の地震時の解析手法は、一般化されたものがないのが現状である。

そこで本論では、粘弾性系に着目し、粘弾性特性を有するエネルギー吸収材料を用いた建築耐震構造の地震応答特性に関する検討を行う。特に、粘弾性体力学特性の振動数依存性に着目し、地震時に架構が塑性化する場合にも応答を評価できる、時刻歴地震応答解析用のモデル化手法について考察する。

研究の目的は大きく分けて次の3点である。

- (1) 一般的に、粘弾性体は大きな振動数依存性・温度依存性を有する。粘弾性体を用いたエネルギー吸収機構の地震時の振動低減効果を評価するためには、粘弾性体の振動数依存性・温度依存性・ひずみ依存性を定量的に明らかにする必要がある。それらの依存性を検討できる詳細な材料試験を行い、粘弾性体の基本的力学特性を明確にする。(2章)
- (2) 粘弾性体の振動数依存性を表すモデルとして、バネーダッシュポットモデル、分数次導関数モデル、減退記憶モデルを比較検討し、上記の材料試験結果を基に、地震応答解析に用いる適切な力学モデルを提案する。粘弾性体ダンパーを試作し、模型架構に組み込み、その動的加力実験結果を基に、粘弾性体の各力学モデルを検証する。(3章)
- (3) 粘弾性体を組み入れた建物の地震応答性状を明らかにするため、上記の力学モデルを用い、粘弾性体によるエネルギー吸収機構を設置した建築物を対象とした地震応答解析を行い、その地震時応答特性の特徴を把握する。また、等価減衰による簡略的な応答評価についての検討を行う。(4章)

2. 粘弾性体の動的加力試験(2章)

アクリル系粘弾性体を対象として、正弦波形によるせん断動的加力試験を恒温槽内で実施した。試験パラメータは、加振振動数、供試体温度、加振振幅とし、試験結果は貯蔵弾性率と損失係数について整理した。試験結果の例として、せん断応力-せん断ひずみ関係を図1に示す。得られた知見を要約すると次のようになる。

- (1) アクリル系粘弾性体力学特性の振動数依存性・温度依存性・振幅依存性が明らかとなった。

粘弾性体の力学特性には振動数依存があり、その依存性は、温度条件、対象とする振動数範囲で異なる。温度 25℃、加振振動数 1Hz 近傍では、10 倍の振動数変化に対し、貯蔵弾性率は 2 倍程度変化する。それに比較し、損失係数の依存性は少ない。

粘弾性体の力学特性には温度依存があり、25℃近傍では、10℃の温度変化に対し、貯蔵弾性率は 2 倍程度変化する。それに比較し、損失係数の依存性は少ない。

振幅が増加するにつれ、貯蔵弾性率は低下するが、温度が低いほど、加振振動数が高いほどその傾向は顕著である。通常の使用温度と考えられる 15～25℃では、加振振動数が 1Hz

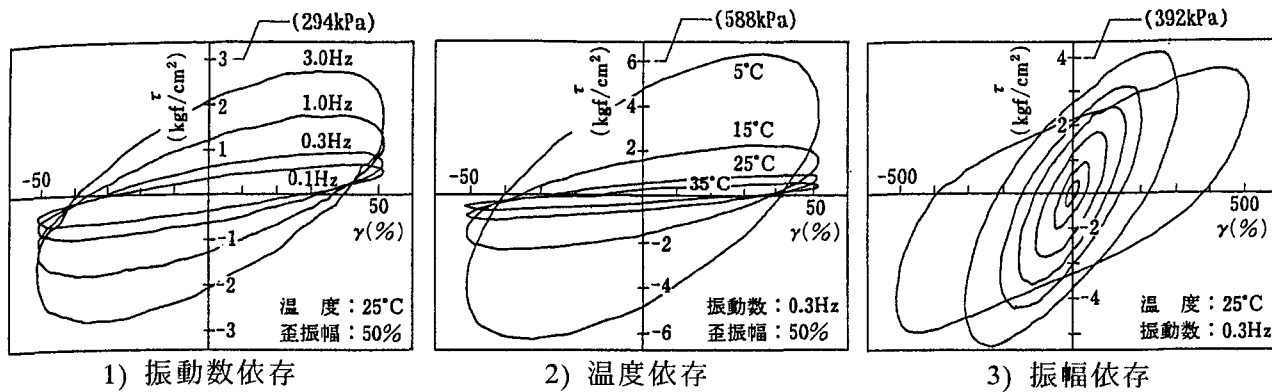


図1 アクリル系粘弾性体のせん断応力-せん断ひずみ関係

以下の場合、ひずみ振幅が5～200%の間では、貯蔵弾性率、損失係数ともほぼ一定とみなせる。

- (2) アクリル系粘弾性体力学特性の振動数依存性と温度依存性について、「時間-温度換算則」が成り立ち、WLF式による移動係数は、試験結果をよく表した。温度範囲が30℃程度以内で、温度依存を推定できる移動係数の簡略式を提案した。「時間-温度換算則」を利用することにより、粘弾性体力学特性の振動数依存性・温度依存性を効率よく測定できると考えられる。
- (3) 建築構造物を対象とする利用が検討された粘弾性体を調査した結果、粘弾性体は遷移領域の低振動数領域側で利用されていることが多い。遷移領域では、粘弾性体力学特性の振動数依存性が大きいので、粘弾性体を利用したエネルギー吸収機構を設置した構造物の地震応答評価に際しては、粘弾性体の振動数依存性の適切な評価が必須と考えられる。

3. 粘弾性体の解析モデル(3章)

粘弾性体を組み込んだ建築構造物の地震応答解析に適用できる、粘弾性体のモデル化手法について検討した。粘弾性体の振動数依存性を考慮できる時刻歴解析用モデル化手法として、

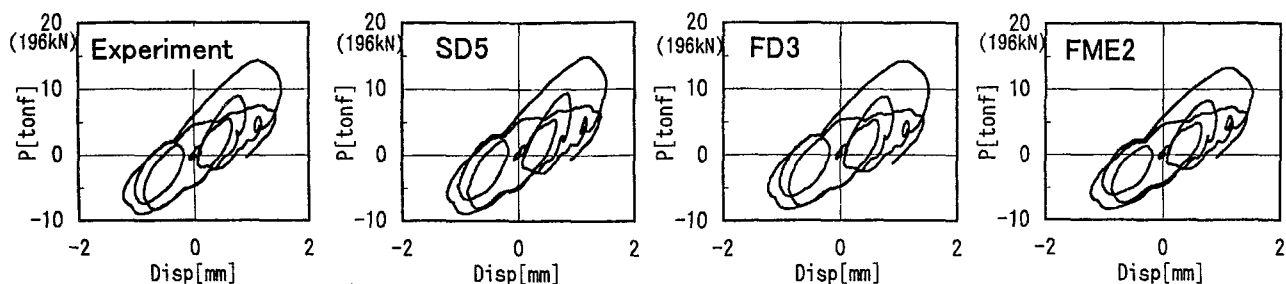
- ①バネ-ダッシュポットモデル(Spring-Dashpot Model)
- ②分数次導関数モデル(Fractional Derivative Model)
- ③減退記憶モデル(Fading Memory Model)

の3手法をとりあげ、振動数領域および時間領域において、手法間の関係を検討した。

また、アクリル系粘弾性体ダンパーを試作し、鉄骨1層1スパンフレーム模型に組み込み、動的加力実験を実施した。ダンパーを設置した29層の建物モデルにEl centro ns波を入力した際の3階での応答層間変位波形を算定し、その変位波形を用いて、試験体を動的に加力した。粘弾性体を3手法によりモデル化した時刻歴解析結果と、実験結果とを比較し、3手法の適用性を検討した。

これらの検討により、次の知見が得られた。

- (1) バネ-ダッシュポットモデルは要素数を増やすことにより、モデルの貯蔵弾性率、損失係数等の振動数依存性を調節できるようになり、広い振動数範囲への対応が可能となる。



SD5 : 5 要素バネダッシュポットモデル、FD3 : 3 要素分数次導関数モデル、FME2 : 2 項指数型減退記憶モデル

図 2 実験結果と解析結果の比較(粘弾性体ダンパーの荷重－変形関係)

- (2) 分数次導関数モデルは、特性の振動数依存の強さを分数次導関数の次数 α により設定できる。また、広い振動数範囲に適用できる一般化分数次導関数モデルを提案した。分数次導関数 3 要素モデル（笠井のモデルと同一）は粘弾性体の一般的性質を良く表した。
- (3) 減退記憶モデルの記憶関数を任意とすれば、バネダッシュポットモデル、および分数次導関数モデルとも、減退記憶モデルによる表現が可能である。また、指数型多項式を記憶関数とした減退記憶モデルとバネダッシュポットモデルは、基本的に同じモデルである。
- (4) アクリル系粘弾性体を対象とした、3 手法による時刻歴解析結果は、いずれも実験により得られた、粘弾性体ダンパーの荷重－変形関係を良く表した(図 2)。各モデルの要素数（パラメータ数）を適切に設定すれば、3 手法とも、構造物の地震応答時刻歴解析に、問題なく適用できる。

4. 粘弾性体エネルギー吸収型耐震架構の地震応答解析(4 章)

アクリル系粘弾性体を対象として、その振動数依存性を考慮した地震応答解析により、エネルギー吸収型耐震架構の地震応答性状について考察した。

まず、粘弾性体の力学特性を Voigt モデルとした場合と、振動数依存性を考慮した分数次導関数モデルとした場合の時刻歴応答解析を行い、両者の応答差異を検討した。

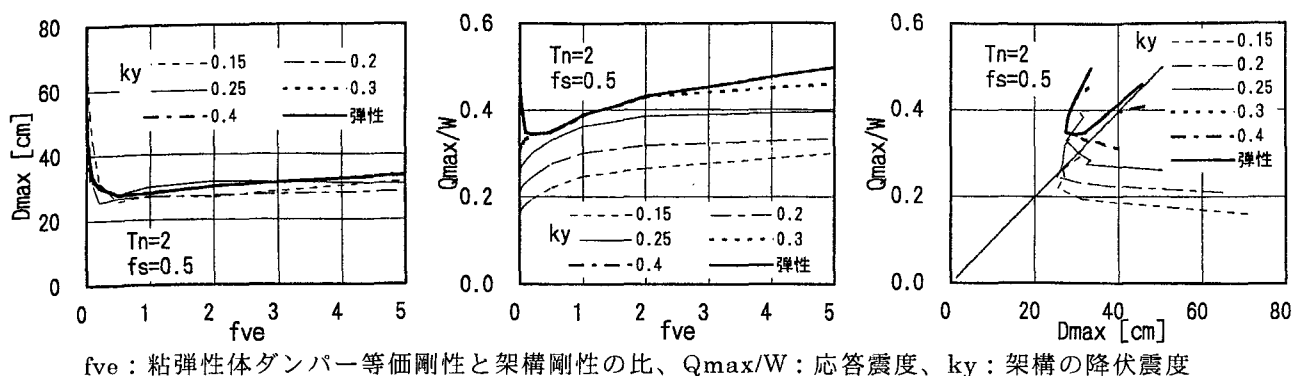
粘弾性体を複素剛性と考え、支持部材と直列に結合された粘弾性体ダンパーを設置した層の等価減衰定数を求め、減衰特性の概略を検討した。

分数次導関数を用いて粘弾性体ダンパーをモデル化し、時刻歴応答解析により、粘弾性体ダンパーを設置した弾性架構の応答特性を検討した。また、地震時に塑性域に達する架構に対しても検討した。

粘弾性体ダンパーを設置した層の等価減衰定数を用い、減衰定数と応答スペクトル低減率の関係から、最大応答値を算定する評価手法について検討した。

検討結果をまとめると、次のようになる。

- (1) 1 次モードのみが卓越する系では、1 次固有振動数成分が卓越するため、基準とする振動数を適切に評価した Voigt モデルにより、粘弾性体を付加した構造物の最大応答を、ある程度評価できる。しかし、複数個のモードが卓越する系では、粘弾性体の振動数依存性を適切に評価したモデルにより解析する必要がある。



f_{ve} : 粘弾性体ダンパー等価剛性と架構剛性の比、 Q_{max}/W : 応答震度、 k_y : 架構の降伏震度

図3 粘弾性体ダンパーによる応答低減効果

(弾塑性架構、固有周期 2sec、支持部材と架構剛性の比 $f_s=0.5$)

- (2) 支持部材の剛性を高めることは、層の等価減衰定数の増大に、大きく寄与している。粘弾性体ダンパーの設置量には、層の等価減衰を最大にする値があり、それ以上設置しても層の減衰を逆に低下させることになる。また、粘弾性体の設置量を検討する場合は、粘弾性体の貯蔵剛性と損失係数の他に、等価剛性も指標としたほうがよいと考えられる。
- (3) 時刻歴解析結果における、粘弾性体ダンパーの応答低減効果は、粘弾性体を複素剛性と考えた前述の検討結果と対応した。近傍断層による直下型地震等により、構造物の固有周期より短周期の応答が卓越することが予想される場合は、粘弾性体ダンパーによる応答低減効果は小さく、逆に、応答せん断力が大きくなる場合がある。
- (4) 架構が塑性化する場合でも、架構が弾性的の場合と同じ程度の変形低減効果がある(図3)。また、架構が塑性化する場合は、粘弾性体ダンパーの付加により、層せん断力をあまり増加させずに、変形を減少させることができる。支持部材剛性が小さい場合は、粘弾性体ダンパーの剛性をいくら大きくしても、架構を弾性とするまでの低減効果はない。
- (5) 等価減衰定数による最大応答値評価手法は、粘弾性体ダンパーを設置した架構の応答を比較的良く推定でき、略設計に十分応用できる。

5. まとめ

粘弾性特性を有するエネルギー吸収材料を用いた建築耐震構造の地震応答特性について検討した。特に、粘弾性体力学特性の時刻歴地震応答解析用モデル化手法の適用性を明らかにした。

今後、平面あるいは立体フレームモデルによる詳細な時刻歴弾塑性応答解析により、粘弾性体ダンパーの効率的配置、連層配置による側柱の付加軸力等の検討を進めていく必要がある。また、耐震用エネルギー吸収材料として、粘弾性体の利用を進めるためには、振動数依存性、温度依存性が少なく、より損失係数の大きな材料の開発が望まれる。

審査結果の要旨

建築物の耐震性を向上させるための一つの方法として、粘弾性体をエネルギー吸収機構に用いた建築構造を取り上げ、その地震応答特性を明らかにすることを主目的として、特に粘弾性材料における振動数依存性を考慮する時間領域解析法に着目して検討を行ったもので、全5章よりなっている。

第1章は序論である。

第2章では、粘弾性体の動力学的特徴について述べている。粘弾性体は振動数依存性、温度依存性を顕著に示す特性があるので、その一般的特徴を既往の研究より定性的に示し、さらに、アクリル系粘弾性体を例として材料特性把握のための試験体を作製し、種々の温度環境下における各振動数での正弦波加力試験を実施して、その動的力学特性を明らかにしている。また、建築物への適用を目的としたその他の各種粘弾性体の既往の試験結果とも比較し、アクリル系粘弾性体の位置づけを示している。

第3章では、振動数依存性を有する粘弾性体の動力学特性を考慮する時刻歴解析モデル化手法について述べている。ここでは、バネ・ダッシュポットを用いる方法、分数次導関数を用いる方法、減退記憶理論を用いる方法を取り上げ、時間領域および振動数領域における解析のそれぞれの特徴や共通点を比較検討している。また、粘弾性体の材料試験体による動的試験結果および粘弾性体ダンパーを組み込んだ模型架構試験体による地震波加振実験結果を対象として、これらの解析モデルを適用し、パラメータを適切に設定すれば時間領域での解析により試験結果をよく捉えられることを示している。

第4章では、粘弾性体をエネルギー吸収材料として組み込んだ建築物の地震応答特性について述べている。解析手法については、バネ・ダッシュポット型モデルの一つである Voigt モデルと分数次導関数を用いたモデルによる比較検討を行い、多層建物の場合には高次モードに対する振動数依存性を考慮する後者のモデルが有効であることを指摘している。また、粘弾性体を複素剛性でモデル化してダンパー設置量と全体架構の等価減衰との関係を定量的に明らかにし、さらに、分数次導関数を用いたモデルにより地震応答解析を実施して、架構特性や地震波などのパラメータに対する動的応答特性および建物架構が塑性化したときの動的特性を明らかにしている。最後に、等価減衰と応答スペクトルを用いて、粘弾性体を用いたエネルギー吸収機構による建物の応答低減効果を巨視的に明らかにしている。

第5章は結論である。

以上を要するに、本論文は、粘弾性体をエネルギー吸収機構として用いた建築耐震構造を対象として、粘弾性体を示す振動数依存性を適切に表現できる時刻歴応答解析のためのモデルを試験結果に基づいて検討し、さらに、構造物の弾塑性応答解析への適用性を明らかにするとともに、建物に設置した場合の応答特性を明らかにしており、建物の損傷を制御する耐震設計法に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。